Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 20, No. 4, Winter 2023, p. 363-379

Calibration and Evaluation of APSIM Model for Simulation of Growth and Development of KSC 704 and Maxima Maize Hybrids under Different Amounts of Nitrogen

M. Madadizadeh[1*], S. R. Amiri[2], J. Kambouzia[1], S. Soufizadeh[1]

Received: 31-07-2021 Revised: 15-05-2022 Accepted: 18-05-2022	**How to cite this article:** Madadizadeh, M., Amiri, S. R., Kambouzia, J., & Soufizadeh, S. (2023). Calibration and Evaluation of APSIM Model for Simulation of Growth and Development of KSC 704 and Maxima Maize Hybrids under Different Amounts of Nitrogen. *Iranian Journal of Field Crops Research, 20*(4), 363-379. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.71744.1071

Introduction

Maize (*Zea mays* L.) is one of the most important cereals after wheat and rice in the tropical and temperate regions of the world. Also, its mean production is 8 ton ha^{-1}. Moreover, the total area of under cultivation is 132572 hectares in Iran. Crop simulation models can play an important role in improving agricultural production systems in many developing countries. Crop models can simulate plant growth processes and grain yield instead of conducting several years of field experiments. On the other hands, crop simulation models should be calibrated and evaluated with independent data sets under different climatic conditions. Therefore, the purpose of this research was evaluation of the APSIM model for simulation of growth, development and yield of maize hybrids in Kerman province under different amounts of nitrogen.

Materials and Methods

The APSIM model was calibrated and validated using measured data from a two-year field experiment conducted in the 2014 and 2015 growing seasons. The experiment was a factorial arrangement based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications conducted at Kerman province in Iran. Four nitrogen rates (0 (control), 92, 220 and 368 kg ha^{-1}) and two maize hybrids (KSC 704 and Maxima) were included in the study. Moreover, inputs of APSIM model were climatic, soil, plant and management data. In order to calibrate the APSIM model, the data of field experiment in the first year (2014) (including flowering date, physiological maturity date, leaf area index, biological yield and grain yield) were included. Moreover, Data from the second experiment (2015) were used to validate the model.

Results and Discussion

Our results showed that APSIM model accurately predicted phenology (nRMSE=4.5%). But the APSIM model did not capture the effect of nitrogen stress on phenology. At the evaluation step, the model couldn't accurately predict the maximum leaf area index (nRMSE=26 and 18% for SC 704 and Maxima hybrids, respectively) which led to overestimate of the results. The nRMSE values for the biological yield of SC 704 and Maxima hybrids were 13.9% and 5.7%, respectively. Furthermore, the values of Wilmot agreement index (d) for these SC 704 (0.95) and Maxima (0.99) indicated a close agreement between the field-measured and simulated values. Furthermore, the nRMSE for grain yield simulation of SC 704 and Maxima hybrids were 13.2 and 11.9 percentage, respectively, revealed that the model accurately simulated the grain yield of maize hybrids.

1- Department of Agroecology, Environmental Science Research Institute, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran
2- Associate Professor, Department of Plant Production, Faculty of Agriculture, Higher Education Complex of Saravan, Iran
(*- Corresponding Author Email: madadi31@gmail.com)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.71744.1071

Conclusion

The evaluation of the APSIM model with the experimental data revealed that the model predicted grain yield, biological yield, days to flowering and maturity of maize hybrids reasonably well. This indicates that the model could be applied for assessing various management practices in maize agro-ecosystems under all parts of the semi-arid regions which has the similar characteristics to the study location. On the other hands, the APSIM model couldn’t predict the effect of different nitrogen levels on phenology.

Keywords: Biomass, Evaluation, Flowering, Grain yield

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۰، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۱، ص ۳۷۹-۳٦۳

واسنجی و تعیین اعتبار مدل APSIM برای شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد دو هیبرید ذرت دانه‌ای در مقادیر مختلف نیتروژن

محمد مددی زاده[1*]، سید رضا امیری[2]، جعفر کامبوزیا[1]، سعید صوفی زاده[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۸

چکیده

هدف از این مطالعه، اعتبارسنجی مدل APSIM در رابطه با قدرت شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت دانه‌ای در استان کرمان با استفاده از دو هیبرید رایج ذرت در پاسخ به مقادیر مختلف نیتروژن بود. به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل APSIM (version, 7.8) تحت شرایط مختلف فراهمی نیتروژن در راستای شبیه‌سازی و کمی‌سازی مراحل رشد فنولوژیک، زیست‌توده اندام‌های مختلف گیاهی و عملکرد دانه ارقام ذرت دانه‌ای، آزمایشی مزرعه‌ای طی دو سال زراعی ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان انجام گرفت. این تحقیق در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با آرایش فاکتوریل در سه تکرار انجام شد. فاکتورها شامل دو هیبرید ذرت دانه‌ای (سینگل‌کراس ۷۰۴ و ماکسیما) و چهار مقدار نیتروژن (۰، ۹۲، ۲۲۰ و ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار) بودند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط مدل APSIM نشان داد که مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال (nRMSE) در رابطه با پیش‌بینی فنولوژی گیاه (تاریخ گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک) برای هر دو رقم به‌ترتیب برابر با ۶/۱۳ و ۲/۳۵ بود اما ضعف اصلی مدل در این قسمت، عدم حساسیت مدل نسبت به تأثیر کمبود نیتروژن بر فنولوژی گیاه بود. مقادیر میانگین nRMSE طی اعتبارسنجی مدل برای شاخص سطح برگ بیشینه دو هیبرید سینگل‌کراس ۷۰۴ و ماکسیما ۱۴/۶ درصد بود. مقادیر مذکور در برداشت نهایی در رابطه با بیوماس کل و عملکرد دانه به‌ترتیب ۹/۳ و ۱۱/۷ درصد بود. به‌طورکلی نتایج نشان داد این مدل قادر است به‌عنوان ابزاری قابل‌اعتماد برای پیش‌بینی صفات مهم گیاهی مانند عملکرد محصول قبل از انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای، کاهش هزینه‌های تحقیقاتی و تخمین صحیح میزان سازگاری هیبریدهای رایج و جدید ذرت در استان کرمان و درعین‌حال شرایط مختلف تغذیه‌ای نیتروژن به‌کار گرفته‌شده و همچنین نقش بسیار مهمی در اتخاذ تصمیمات خرد و کلان مدیریتی در راستای مدیریت پایدار مزارع ذرت در استان کرمان ایفا نماید.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، رسیدگی فیزیولوژیک، شاخص سطح برگ، گلدهی

مقدمه

مساله‌ی تولید و تامین غذا به دلیل پیچیدگی و تنوعی که در عصر حاضر به خود گرفته، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه به سبب عوامل متعددی مانند نرخ رشد بالای جمعیت، تشدید پدیده شهرنشینی، مدیریت نامناسب عملیات زراعی، افزایش تخریب و فرسایش خاک، کاهش شدید و مداوم سطح زمین‌های قابل کشت، گسترش دامنه تنش‌های شوری و خشکی در اراضی، بیابان‌زایی، استفاده بی‌رویه از نهاده‌های شیمیایی، تخریب محیط‌زیست به یک بحران جهانی تبدیل شده است (Tscharntke *et al*., 2012). کشاورزی مهم‌ترین بخش اقتصادی در بسیاری از کشورهای در حال توسعه به‌شمار رفته و انتظار می‌رود غذای جمعیت پیش‌بینی شده ۹/۱ میلیارد نفری جهان تا سال ۲۰۵۰ را تامین نماید. بنابراین پاسخگویی به این تقاضا با وجود چالش‌های مذکور فشار عظیمی بر بخش کشاورزی وارد می‌سازد (Amjed *et al*., 2012).

ذرت (*Zea mays* L.) از جمله غلات مهم و با ارزش مناطق گرمسیر و معتدل جهان است که پس از گندم و برنج در جایگاه سوم اهمیت جهانی قرار دارد (FAO, 2015). کشور ایران با مجموع ۱۳۲۵۷۲ هکتار سطح زیر کشت ذرت دانه‌ای و متوسط عملکرد هشت

۱- گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲- دانشیار گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی، مجتمع آموزش عالی سراوان، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: madadi31@gmail.com
https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.71744.1071

تن دانه در هکتار، سالانه حدود ۱۰۸۹۴۱۰ تن ذرت دانه‌ای تولید می‌کند (Anonymous, 2020). استان کرمان (۱۲۵۰۰ هکتار) و حوزه‌ی جنوب این استان (۱۳۰۰۰ هکتار) مجموعا با ۲۵۵۰۰ هکتار سطح زیر کشت ذرت دانه‌ای و متوسط عملکرد ۶۵۰۰ کیلوگرم دانه در هکتار، رتبه دوم تولید این محصول را پس از استان خوزستان (۵۴۰۰۰ هکتار) در کشور دارا می‌باشد (Anonymous, 2020). در مقایسه با سایر غلات، ذرت نیاز بیشتری به کود نیتروژنی دارد (Hopkins *et al*., 2008; Abera, 2013). حداکثر جذب نیتروژن به‌وسیله ذرت در طول ماه قبل از ظهور گل تاجی و ابریشم‌دهی رخ می‌دهد (Alley *et al*., 2009). متاسفانه مصرف کود شیمیایی برای ذرت توسط بسیاری از کشاورزان در بسیاری از نقاط دنیا بر مبنای اصول صحیح و علمی صورت نمی‌گیرد. زیرا این توصیه‌ها اغلب بدون توجه به خصوصیات متفاوت فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مختلف، وضعیت پویایی عناصر تغذیه‌ای خاک و همچنین شرایط محیطی انجام می شود (Antonietta *et al*., 2015).

از طرف دیگر، با توجه به میانگین عملکرد ذرت دانه‌ای در کشور و استان کرمان (۸ تا ۹ تن در هکتار) (Anonymous, 2020) و مقایسه‌ی آن با متوسط عملکرد قابل دستیابی (۱۴ تا ۱۵ تن در هکتار) (Muller *et al*., 2012)، مشخص می‌گردد که ارزیابی تاثیر عوامل اصلی تعیین‌کننده‌ی تولید (اقلیم، خاک، ژنوتیپ و عوامل مدیریتی) در کنار یکدیگر بر تولید محصول با استفاده از رهیافت مدل‌سازی می‌تواند نقش بسیار مهمی در بهبود عملکرد تولیدی و مدیریت پایدار مزارع ایفا نماید.

در واقع می‌توان گفت رهیافت مدل‌سازی تنها راه تلفیق یافته‌های تحقیقاتی حاصل از مطالعات صورت گرفته در بخش‌های مجزا از یکدیگر می‌باشند (Soltani, 2012). در چنین شرایطی این مدل‌ها می‌توانند به‌عنوان ابزارهای جدید در راستای صرفه‌جویی در زمان و بهبود اثربخشی و یا به حداقل رساندن هزینه مربوط به بسیاری از تحقیقات کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند. بدین معنا که طیف وسیعی از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان در مقیاس‌های منطقه‌ای و ملی می‌توانند به‌منظور پیش‌بینی عملکرد گیاهان مورد استفاده قرار گیرند (Amjed *et al*., 2012). پاکنژاد و همکاران (Paknejad *et al*., 2017) در شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت سطوح مختلف نیتروژن در شرایط اقلیمی کرج با استفاده از مدل DSSAT نشان دادند که مدل توانایی مناسبی در شبیه‌سازی فرایندهای رشد و نمو و عملکرد ذرت در ۴ سطح نیتروژن دارد. در مطالعه آن‌ها مقدار nRMSE برای بیوماس و عملکرد کمتر از ۲۰ درصد بود. در مطالعه دیگری (Ebrahimi *et al*., 2015)، شبیه‌سازی رشد ذرت تحت مدیریت‌های مختلف آب و نیتروژن با مدل AquaCrop مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی نشان داد که مقدار nRMSE جهت تخمین عملکرد دانه و بیوماس کل به‌ترتیب برابر با ۵ و ۲۰ درصد بود. افضلی و همکاران (Afzali *et al*., 2018) در ارزیابی کارایی مدل WOFOST برای شبیه‌سازی رشد و نمو ذرت در شرایط اقلیمی نیمه‌گرمسیر جنوب کرمان نشان دادند که ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب کارایی مدل برای عملکرد دانه، بیوماس کل و شاخص برداشت به‌ترتیب ۹ درصد، ۰/۸۷ و ۰/۸۲ بود که بیانگر دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد و بیوماس کل بود. مدل APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) یک چارچوب مدل‌سازی مبتنی بر زیر مدل‌های[1] مختلف می‌باشد که توسط واحد تحقیقات سیستم‌های تولید کشاورزی در استرالیا توسعه یافته است. APSIM مدلی مکانیستیک و فرآیندگرا بوده که با به‌کارگیری زیرمدل‌های مختلف (زیرمدل‌های بیولوژیک، محیطی، مدیریتی و اقتصادی که با موتور اصلی مدل مرتبط می‌شوند) قادر به شبیه‌سازی سیستم‌های کشاورزی به‌ویژه در نواحی نیمه‌خشک می‌باشد (McCown *et al*., 1996). در واقع مدلی‌ست که قادر است بر اساس اهداف تعیین‌شده در سیستم‌های کشاورزی، رشد و نمو گیاهان، فرآیندهای خاک و طیف وسیعی از عملیات مدیریتی را شبیه‌سازی نماید (Ahmed & Hassan, 2011). این مدل به منظور شبیه‌سازی فرآیندهای بیوفیزیکی در سیستم‌های کشاورزی، به‌ویژه در مواردی که پیامدهای اقتصادی و اکولوژیک ناشی از عملیات مدیریتی در مواجهه با خطرات اقلیمی وجود دارند، طراحی شده است. زیرمدل‌های این مدل شامل دامنه وسیعی از گیاهان زراعی، چراگاه‌ها و درختان، اثرات متقابل بین گیاه و علف‌های هرز، فرآیندهای خاک شامل بیلان آب، تغییرات ماده آلی خاک، تبدیل نیتروژن و فسفر، pH خاک، آبشویی نیترات، فرسایش و طیف گسترده‌ای از عملیات مدیریتی می‌باشد. مدل APSIM دارای کاربردهای بسیار متنوعی مانند حمایت از تصمیم‌سازی‌های مزرعه‌ای، طراحی سیستم‌های کشاورزی با هدف مدیریت منابع، ارزیابی اهمیت پیش‌بینی اقلیم فصلی، تحلیل مسائل مربوط به زنجیره تولید در فعالیت‌های تجاری کشاورزی، توسعه راهکارهای مدیریت ضایعات، ارزیابی خطر برای سیاست‌گذاری‌های دولتی و تسهیل فعالیت‌های آموزشی و تحقیقاتی در بخش کشاورزی می‌باشد (Keating *et al*., 2003). گزارش‌های متعددی در تایید قدرت بالای مدل APSIM در شبیه‌سازی رشد و عملکرد برخی گیاهان زراعی از جمله ذرت در مناطق خشک و نیمه‌خشک وجود دارد (Heng *et al*., 2007; Shamudzarira & Robertson, 2002; Delve *et al*., 2009; Rahimi-Moghaddam *et al*., 2018, 2019).

از میان عناصر غذایی، نیتروژن مهم‌ترین عنصر تاثیرگذار بر رشد گیاه می‌باشد (Kaur *et al*., 2012)؛ که امروزه به‌طور فشرده در سیستم‌های کشاورزی مدرن به منظور بیشینه‌سازی عملکرد گیاهان

1- Module

مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wu *et al*., 2011). مقدار نیتروژن توصیه شده برای تمامی گیاهان زراعی از جمله ذرت بسته به عوامل متعددی مانند رقم، منطقه کاشت، بقایای گیاهی، فراهمی آب، نوع خاک، تناوب زراعی و علف‌های هرز متفاوت است (Antonietta *et al*., 2015). از این‌رو با توجه به نگرانی‌های روزافزون در رابطه با اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از مصرف زیاد کودهای نیتروژنی و همچنین هزینه‌ی اقتصادی بالای تامین این کودها و در نهایت لزوم بهره‌گیری از دانش مدل‌سازی به‌عنوان ابزاری بسیار سودمند و کارا در راستای مدیریت پایدار مزارع (به‌واسطه‌ی در نظر گرفتن تاثیر تمامی عوامل در کنار یکدیگر)، تحقیق حاضر با هدف اعتبارسنجی مدل APSIM در رابطه با قدرت شبیه‌سازی رشد و نمو و عملکرد ذرت دانه‌ای در استان کرمان و مقایسه‌ی رشد و عملکرد دو هیبرید رایج ذرت در پاسخ به مقادیر مختلف نیتروژن انجام شد.

مواد و روش‌ها

طرح آزمایش

آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار طی دو کشت تابستانه در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ در ایستگاه تحقیقاتی شهید زنده‌روح (عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۵ دقیقه و طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۵۸ دقیقه) متعلق به مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان واقع در ۱۰ کیلومتری جنوب شهرستان کرمان (کیلومتر ۱۲ محور کرمان- جوپار) انجام شد. فاکتورها چهار مقدار کود نیتروژنه شامل: صفر، ۲۵ درصد مقدار بهینه (۹۲ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار)، ۶۰ درصد مقدار بهینه (۲۲۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار) و مقدار بهینه (۳۶۸ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار) از منبع اوره و فاکتور دوم هیبرید سینگل-کراس ۷۰۴ و ماکسیما ذرت دانه‌ای بودند. مبنای مقدار بهینه کود نیتروژنی، تحقیقات صورت گرفته توسط محققین مرکز تحقیقات کشاورزی استان کرمان در ایستگاه تحقیقاتی مذکور روی رقم هیبرید سینگل کراس ۷۰۴ و همچنین مطالعات دیگر (Ebrahimi *et al*., 2015) می‌باشد که بین ۸۰۰-۷۰۰ کیلوگرم کود اوره (۴۶ درصد نیتروژن) در هکتار توصیه گردید. انتخاب ارقام مورد مطالعه با توجه به ارقام غالب و رایج در استان کرمان صورت گرفت. حدود ۹۰ درصد سطح زیر کشت ذرت در استان کرمان مربوط به هیبرید سینگل کراس ۷۰۴ بوده و حدود ۵ درصد مربوط به رقم ماکسیما و مابقی مربوط به سایر هیبریدهاست. رقم ماکسیما سال ۱۳۸۵ معرفی شده و سطح زیر کشت آن رو به افزایش است. همچنین به دلیل ذخیره‌ی ژنتیکی غنی‌تر نسبت به سینگل-کراس ۷۰۴، مقاومت بالاتری نسبت به تنش‌ها و بیماری‌ها از خود نشان داده اما عملکرد پایین‌تری دارد (Zsubori *et al*., 2013). رقم ماکسیما (MV 524 Maxima) متعلق به گروه هیبریدهای FAO 580 و متوسطرس بوده (Zsubori *et al*., 2013) و از تلاقی اینبردلاین MO17 به‌عنوان والد پدری و سینگل‌کراس ۵۲۴ به‌عنوان والد مادری تولید می‌شود.

عملیات زراعی

اولین آبیاری سه روز قبل از کاشت انجام شد. در هر کدام از سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ کاشت بذور به روش نم‌کاری (هیرم‌کاری) در تاریخ سیزدهم اردیبهشت ماه به‌صورت دستی انجام شد. هر کرت آزمایشی به مساحت ۳۱/۵ متر مربع شامل هفت ردیف کاشت به طول شش متر و فاصله‌ی بین ردیف ۰/۷۵ متر بود. به منظور دستیابی به تراکم ۷/۵ بوته در متر مربع، فاصله بوته روی ردیف‌های کاشت معادل ۱۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور اطمینان از حصول تراکم فوق، در هر کپه سه بذر کاشته و سپس در مرحله سه تا چهار برگی نسبت به تنک‌کاری مزرعه اقدام گردید.

عملیات کوددهی در هر سال همزمان با کاشت به صورت دستی با مصرف ۳۰۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تریپل (TSP, 45% P_2O_5) به‌عنوان منبع فسفر و ۱۰۰ کیلوگرم کود سولوپتاس (SOP, 51% K_2O) به‌عنوان منبع پتاسیم انجام شد. نحوه کاربرد کودهای مذکور به‌صورت شیاری و با فاصله ۴-۳ سانتی‌متری پایین‌تر از عمق کاشت بذر، همزمان با کاشت در زیر خاک بود. مجموع کود اوره تعیین شده برای هر واحد آزمایشی به سه قسمت تقسیم شده به طوری که یک-سوم آن در هنگام سبز کرد کامل مزرعه[1]، یک- سوم در هنگام ظهور گل تاجی[2] و یک- سوم باقی‌مانده همزمان با ابریشم‌دهی[3] گیاه به کرت‌ها اضافه شد (Gungula *et al*., 2003).

طی عملیات داشت، مبارزه دستی با تمامی علف‌های هرز مزرعه در چندین مرحله صورت گرفته و سایر اقدامات مانند آبیاری و مبارزه با آفات و بیماری‌های احتمالی در بهترین سطح خود انجام شد؛ به گونه‌ای که به استثنای محدودیت نیتروژن در برخی واحدهای آزمایشی، هیچ‌گونه تنش قابل کنترل دیگری در مزرعه حاکم نباشد. آبیاری مزرعه به روش غرقابی انجام شد؛ بنابراین، هر زمان که ۳۵ درصد رطوبت قابل دسترس خاک در عمق ۲۰ سانتی‌متر تخلیه می‌شد، آبیاری صورت می‌گرفت. در هر نوبت آبیاری رطوبت خاک تا عمق ۸۰ سانتی‌متری به نقطه ظرفیت مزرعه برگردانده شد. مقدار کمبود رطوبت خاک از رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$SMD_{\text{شاهد}} = (\Theta_{FC} - \Theta s) \times Dr \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، SMD مقدار کمبود رطوبت بر اساس میلی‌متر، Θ_{FC} مقدار رطوبت حجمی خاک در ظرفیت مزرعه، (۱۵/۵) و Θs

1- Emergence
2- Tasseling
3- Silking

میزان رطوبت حجمی خاک در عمق ۲۰ سانتی‌متر قبل از آبیاری و Dr عمق موثر ریشه ذرت (۸۰ سانتی‌متر) است (FAO, 2008).

از طرف دیگر، مقدار آب آبیاری برای هر کرت در تیمار شاهد از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$I = SMD \times A \quad (۲)$$

که I مقدار آب آبیاری بر اساس میلی‌متر، SMD مقدار کمبود رطوبت (میلی‌متر) محاسبه شده در رابطه و A سطح کرت (متر مربع) است. برای جبران هر میلی‌متر کمبود رطوبت در متر مربع، یک لیتر آب استفاده شد. با استفاده از کنتور میزان آب مورد نیاز به‌صورت غرقابی به کرت‌ها داده شد. اندازه‌گیری‌ها و نمونه‌برداری‌ها به‌طور کلی اندازه گیری‌های مربوط به آزمایش حاضر به سه بخش کلی پارامترهای خاک، اقلیم (آب و هوایی) و گیاه تقسیم می‌شوند.

نمونه‌برداری خاک

نمونه‌گیری از خاک به روش مرکب انجام شد. پس از آماده‌سازی زمین، چندین نمونه تصادفی از سه لایه ۱۵-۰، ۳۰-۱۵ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متری خاک گرفته شد و پس از مخلوط کردن نمونه‌های مربوط به هر لایه با یکدیگر، سه نمونه (یک نمونه همگن از هر لایه خاک به آزمایشگاه ارسال گردید. برخی از صفات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی شامل بافت خاک (درصد رس، سیلت و شن)، وزن مخصوص ظاهری، pH، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، میزان کربن آلی، هدایت الکتریکی (EC)، غلظت نیتروژن معدنی به تفکیک نیترات و آمونیوم، فسفر و پتاسیم اندازه‌گیری شد. خاک مزرعه از نوع شن- لومی بوده و سایر اطلاعات مربوط به آن در جدول ۱ آورده شده است. قابل ذکر است که مزرعه مورد نظر دو سال قبل از انجام آزمایش به‌صورت آیش بود.

جدول ۱- خصوصیات خاک در ایستگاه تحقیقاتی شهید زنده‌روح کرمان در سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹٤

Table 1- Soil characteristics of Shahid Zande Rouh research station in Kerman in 2014 and 2015.

خصوصیات Charectristics	عمق خاک Soil depth(cm)					
	0-15		15-30		30-60	
	سال ۱۳۹۴ (2015)	سال ۱۳۹۳ (2014)	سال ۱۳۹۴ (2015)	سال ۱۳۹۳ (2014)	سال ۱۳۹۴ (2015)	سال ۱۳۹۳ (2014)
Sand (%) شن (درصد)	86	86	84	84	78	78
Silt (%) سیلت (درصد)	8	8	10	10	16	16
Clay (%) رس (درصد)	6	6	6	6	6	6
وزن مخصوص ظاهری ($g\ cm^{-3}$) Bulk density	1.50	1.52	1.60	1.62	1.39	1.4
pH اسیدیته	8	8	7.8	7.9	7.8	7.9
EC ($dS\ m^{-1}$) هدایت الکتریکی	1.1	1.2	2	1.9	1.9	2
Organic carbon (٪) کربن آلی	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Nitrate ($mg\ L^{-1}$) نیترات	72.2	73.1	80	79.4	8.4	8.2
Ammonium آمونیوم ($mg\ L^{-1}$)	2.79	2.76	2.20	2.26	2.11	2.13
P (ppm) فسفر قابل جذب	10	10	4	4	4	4
K (ppm) پتاسیم قابل جذب	200	200	178	180	119	120

داده‌های اقلیمی (آب و هوایی)

داده‌های اقلیمی مورد نیاز متشکل از درجه‌حرارت‌های بیشینه و کمینه، طول روز، تعداد ساعات آفتابی و میزان بارندگی بوده که از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک شهرستان کرمان واقع در ۵ کیلومتری محل انجام آزمایش جمع‌آوری و آماده‌سازی شد (دوره رشد گیاه: ۱۳ اردیبهشت تا ۲۹ شهریور). از آن‌جایی که به‌طور معمول شدت تشعشع روزانه در ایستگاه‌های سینوپتیک در کشور به‌طور منظم جمع‌آوری نمی‌شود، برآورد مقدار این متغیر بر اساس طول ساعات آفتابی و با استفاده از ضرایب غیر خطی آنگستروم صورت گرفت (Prescott, 1940). جهت بررسی داده‌های گمشده کنترل نهایی داده‌های اقلیمی با استفاده از نرم‌افزار ودرمن[1] انجام شد (Hoogenboom *et al.*, 2021). اطلاعات مربوط به داده‌های آب و هوایی در جدول ۲ آورده شده است.

1- Weatherman

جدول ۲- میانگین مقادیر ماهیانه‌ی دمای بیشینه هوا (درجه سانتی‌گراد)، دمای کمینه هوا (درجه سانتی‌گراد)، دمای متوسط هوا (درجه سانتی‌گراد)، تابش خورشیدی (مگاژول بر متر مربع در روز) و متوسط بارش (میلی‌متر) برای ماه‌های اردیبهشت تا مهر در کرمان طی سال‌های ۱۳۹۳ (۲۰۱٤) و ۱۳۹٤ (۲۰۱۵) (دوره رشد گیاه: ۱۳ اردیبهشت تا ۲۹ شهریور)

Table 2- Mean monthly values of maximum and minimum temperature and mean temperature, solar radiation and precipitation for the months of May to October in Kerman during 2014 and 2015 (crop growth period: May 3 to September 20)

ماه Month	متوسط بارش Mean precipitation (mm)	تابش خورشیدی Solar (MJ m^{-2} d^{-1}) radiation	دمای متوسط Mean temperature (°C)	متوسط دمای کمینه Mean minimum temperature (°C)	متوسط دمای بیشینه Mean maximum temperature (°C)
۱۳۹۳ (2014)					
اردیبهشت May	0	25.666	22.1	13	29.5
خرداد June	0	28.622	27.4	16.5	35.7
تیر July	0	29.099	28.6	17.5	36.8
مرداد August	0	27.473	25.8	14.8	34.9
شهریور September	0	24.746	23.3	12.6	33.9
مهر October	0	20.020	17.7	8.1	27.4
میانگین Mean	0	25.941	24.2	13.8	33
۱۳۹٤ (2015)					
اردیبهشت May	0.1	25.742	22.5	13.5	31.4
خرداد June	0	31.144	26.3	16.8	35.8
تیر July	0	27.500	26.7	18.7	34.7
مرداد August	0	27.711	24.7	14.9	34.5
شهریور September	0	23.835	20.7	11.2	30.3
مهر October	0	19.400	19	9.3	28.6
میانگین Mean	0	25.888	23.3	14.1	32.6

به‌طور کلی وضعیت تقریبا مشابهی از نظر شرایط آب و هوایی طی فصل رشد گیاه در بین دو سال آزمایش وجود داشت. میانگین دمای بیشینه طی فصل رشد گیاه در سال ۱۳۹۳ حدود ۰/۵ درجه سانتی‌گراد بالاتر از سال ۱۳۹۴ بود؛ در حالی که مقدار دمای کمینه به‌طور متوسط حدود ۰/۳ درجه سانتی‌گراد کمتر بود. دمای متوسط روزانه در سال ۱۳۹۳ حدود ۰/۹ درجه سانتی‌گراد بالاتر از سال ۱۳۹۴ بود (۲۴/۲ در مقایسه با ۲۳/۳ درجه سانتی‌گراد). در هیچ‌کدام از سال‌ها هیچ‌گونه بارشی در طی دوره رشد ذرت ثبت نشد.

اندازه‌گیری‌های گیاهی

اندازه‌گیری‌های مربوط به ذرت شامل ثبت تاریخ وقوع مراحل اصلی فنولوژیک (سبز شدن، ظهور گل تاجی، ابریشم‌دهی و بلوغ فیزیولوژیک) و اندازه‌گیری سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی به تفکیک اندام، ارتفاع بوته و تعداد برگ بودند. بدین منظور نمونه‌برداری‌های تخریبی از دو هفته پس از کاشت آغاز شده و تا انتهای فصل رشد ادامه یافت. در هر مرحله‌ی نمونه‌برداری، تعداد چهار بوته ذرت از سطح خاک قطع شده و صفات مربوط به سطح برگ و وزن اندام‌ها اندازه‌گیری شد.

به منظور تعیین زمان وقوع هر یک از مراحل اصلی فنولوژیک، تعداد ۱۰ بوته (بوته‌های شاخص) در ابتدای فصل در هر کرت علامت‌گذاری شده و تاریخ وقوع مراحل فنولوژیک مورد نظر در آن‌ها ثبت گردید. ملاک ثبت یک مرحله فنولوژیک معین، ورود حداقل ۵۰٪ گیاهان علامت‌گذاری شده در هر کرت به مرحله فنولوژیک مورد نظر بود. با توجه به وجود اختلاف در زمان رسیدگی ارقام، پس از حصول اطمینان از بلوغ فیزیولوژیک در هر کدام از رقم‌ها، نسبت به برداشت هر رقم و اندازه‌گیری‌های نهایی اقدام گردید.

در برداشت نهایی سطحی معادل پنج متر مربع از دو ردیف کاشت میانی از هر کرت انتخاب شده و به‌طور کامل از سطح زمین برداشت شد. از میان بوته‌های برداشت شده، تعداد ۱۰ بوته به‌طور تصادفی انتخاب و صفاتی مانند وزن خشک دانه و برگ اندازه‌گیری شدند.

سپس تعداد بوته و تعداد بلال در سطح پنج متر مربع شمارش شده و پس از کاهش رطوبت دانه به ۱۴٪، تعداد دانه، عملکرد دانه و عملکرد بیوماس در این سطح اندازه‌گیری شد. تمامی مواد گیاهی حاصل از نمونه‌گیری‌های تخریبی در طول فصل رشد و برداشت نهایی در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد آون خشک و سپس توزین شدند.

شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت با استفاده از مدل APSIM (version, 7.8)

در آزمایش حاضر پس از آماده‌سازی داده‌های اقلیمی، خاکی، گیاهی و مدیریتی به‌عنوان ورودی‌های مدل APSIM، رشد و عملکرد دو رقم ذرت دانه‌ای تحت تاثیر مقادیر مختلف کود نیتروژن توسط مدل برای سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ شبیه‌سازی شد.

اولین مرحله در شبیه‌سازی، ایجاد یک فایل مربوط به داده‌های هواشناسی (.met) شامل مقادیر روزانه متغیرهایی مانند بارش، حداقل دمای روزانه، حداکثر دمای روزانه و تابش خورشیدی بود. مقادیر مربوط به میانگین سالانه‌ی دمای محیط (TAV) و دامنه‌ی تغییرات دمای ماهیانه در طول سال (AMP) بر اساس مقادیر روزانه‌ی دماهای کمینه و بیشینه محاسبه شدند. مقادیر محاسبه شده برای TAV و AMP به کمک نرم‌افزار tav_amp وارد فایل هواشناسی (met file) شدند. داده‌های خام در فایل هواشناسی بر اساس ایستگاه هواشناسی مورد استفاده (نام ایستگاه)، عرض جغرافیایی، سال(ها)، روز(ها)، بارندگی (میلی‌متر)، کمینه و بیشینه‌ی دما (درجه سانتی‌گراد)، تابش خورشیدی (مگاژول بر متر مربع)، TAV و AMP مرتب شدند.

زیرمدل[1] خاک در مدل APSIM نیازمند برخی پارامترهای خاکی مانند وزن مخصوص ظاهری (BD)، هواخشک (Air-Dry)، نقطه‌ی اشباع خاک (SAT)، درصد کربن آلی (OC%)، حد بالای زهکشی (حد بالای آب قابل دسترس برای گیاه) (DUL)، حد پایین زهکشی (حد پایین آب قابل دسترس برای گیاه) (LL15) و اسیدیته خاک (pH) برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت می‌باشد. برای محاسبه و کالیبراسیون برخی پارامترهای خاکی از نرم‌افزارهای SPAW Hydrology و Soil Water Characteristics استفاده شد. مقادیر کالیبره شده برای پارامترهای یاد شده در رابطه با خاک مزرعه آزمایشی در جدول ۳ آورده شده است.

به منظور تعیین پارامترهای گیاهی (ضرایب ژنتیکی) مربوط به هر کدام از هیبریدهای مورد استفاده در این آزمایش، از نتایج حاصل از آزمایش مزرعه‌ای در سال اول (۱۳۹۳) استفاده شد. بدین ترتیب برای دستیابی به ضرایب ژنتیکی مربوط به دو رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ و ماکسیما به‌ترتیب از ارقام پیش‌فرض Pioneer_3237 و Pioneer_3527 استفاده شد که مقادیر آن‌ها در جدول ۴ آورده شده است.

1- Module

زیرمدل مدیریتی[2] در مدل APSIM به منظور توصیف عملیات مدیریتی صورت گرفته در مزرعه قبل از انجام شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این قسمت اطلاعاتی مانند تاریخ کاشت، تراکم کاشت، عمق و فاصله ردیف‌های کاشت و زمان و مقدار مصرف کود به مدل داده می‌شود.

در نهایت رشد ذرت بر مبنای واحد روزانه در پاسخ به شرایط اقلیمی، خاکی و مقادیر نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار) بسته به ضرایب گیاهی (ژنتیکی) برای هر رقم شبیه‌سازی گردید.

واسنجی (کالیبراسیون[3]) و اعتبارسنجی[4] مدل APSIM

به‌منظور واسنجی (کالیبراسیون) مدل APSIM از داده‌های حاصل از آزمایش مزرعه‌ای در سال اول (۱۳۹۳) (شامل مقادیر مربوط به تاریخ گلدهی، تاریخ رسیدگی فیزیولوژیک، شاخص سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه) استفاده شد.

واسنجی مدل در سه مرحله انجام شد. نخست، تعدادی از پارامترهای گیاهی بر اساس داده‌های مشاهده شده آزمایش مزرعه‌ای تغییر داده شدند. این پارامترها با اجرای مکرر مدل تخمین زده شدند تا اختلاف داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده کاهش یابد (جدول ۴). در مرحله دوم، این پارامترهای تغییریافته برای شبیه‌سازی رشد گیاه ذرت با توجه به در دسترس بودن داده‌های آب و هوایی روزانه مورد استفاده قرار گرفتند. شبیه‌سازی‌ها از تاریخ کاشت تا رسیدگی ادامه یافت. داده‌های حاصل از دومین سال آزمایش (۱۳۹۴) برای اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. علاوه براین، از داده‌های دو آزمایش مزرعه‌ای دیگر (Choukan, 2013; Rafiee Manesh *et al.*, 2010) که شامل تیمارهای مختلف کود نیتروژن و رقم بود جهت اعتبارسنجی عملکرد استفاده شد.

شاخص‌های ارزیابی مدل

به‌منظور ارزیابی کارآیی مدل APSIM در پیش‌بینی فنولوژی، صفات رشدی و عملکرد دانه هیبریدهای ذرت دانه‌ای (سینگل‌کراس و ماکسیما) تحت شرایط متفاوت فراهمی نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار) از برخی معیارهای آماری استفاده شد. از آن‌جایی‌که هر کدام از معیارهای آماری معمولا جنبه‌ی خاصی از کارکرد مدل را مورد بررسی قرار داده و تقریبا هیچ‌کدام از آن‌ها به‌تنهایی قادر به انجام یک ارزیابی جامع و کلی از مدل نمی‌باشند (Liu *et al.*, 2011)، لذا برخی از مهم‌ترین شاخص‌های آماری به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفتند (روابط ۳ تا ۷) (Wilks, 2011; Willmott *et al.*, 2012).

2- Manager module
3- Calibration
4- Evaluation

جدول ۳- کالیبراسیون برخی پارامترهای خاکی مورد نیاز مدل APSIM برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد هیبریدهای ذرت تحت تاثیر مقادیر مختلف نیتروژن

Table 3- Calibration of some soil parameters required by APSIM model to simulate the growth and yield of maize hybrids under different amounts of nitrogen.

	مقادیر تغییر یافته (Modified values)	مقادیر اولیه (Default values)	مقادیر تغییریافته (Modified values)	مقادیر اولیه (Default values)	مقادیر تغییریافته (Modified values)	مقادیر اولیه (Default values)
عمق لایه‌ی خاک (cm) Soil depth	30-60		15-30		0-15	
وزن مخصوص ظاهری (BD) (g cm^{-3})	1.40	1.42	1.62	1.60	1.52	1.50
هوا خشک (Air-Dry) (mm mm^{-1})	0.29	0.31	0.26	0.24	0.15	0.16
حد پایین زهکشی (حد پایین آب قابل دسترس برای گیاه) (mm mm^{-1}) (LL15)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
حد بالای زهکشی (حد بالای آب قابل دسترس برای گیاه) (mm mm^{-1}) (DUL)	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
ضریب زهکشی (SWCON)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
نقطه‌ی اشباع (SAT) (mm mm^{-1})	0.59	0.56	0.58	0.57	0.59	0.6

جدول ٤- مقادیر ضرایب ژنتیکی مورد استفاده برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد دو هیبرید سینگل‌کراس ۷۰٤

Table 4- The values of the genetic coefficients used to simulate the growth and yield of the two hybrids KSC and Maxima

ضرایب ژنتیکی **Genetic coefficients**	واحد **Unit**	سینگل‌کراس ۷۰۴ **KSC 704**	ماکسیما **Maxima**
حداکثر تعداد دانه در گیاه (head_grain_no_max)	-	850	750
نیاز دمایی تجمعی (سبز شدن تا پایان مرحله جوانی) (tt_emerg_to_endjuv)	درجه روز رشد(GDD)	270	240
نیاز دمایی تجمعی (انتهای مرحله جوانی تا گل‌آغازی) (estt_endjuv_to_init)	درجه روز رشد(GDD)	20	20
نیاز دمایی تجمعی (گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک) (tt_flower_to_maturity)	درجه روز رشد (GDD)	980	980
نیاز دمایی تجمعی (ظهور برگ پرچم تا گلدهی) (tt_flag_to_flower)	درجه روز رشد (GDD)	50	50
نیاز دمایی تجمعی (گلدهی تا شروع پر شدن دانه) (tt_flower_to_start_grain)	درجه روز رشد (GDD)	120	120

جذر میانگین مربعات خطای نرمال (nRMSE[1]) (روابط ۳ و ۴):

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(Pi - Oi)^2} \quad (۴)$$

که در آن، RMSE: جذر میانگین مربعات خطا، N: تعداد داده‌های مشاهده شده (با در نظر گرفتن تکرار در آزمایش)، Pi: داده شبیه‌سازی شده، Oi: داده مشاهده شـده، $\bar{O}$: میـانگین داده‌هـای مشـاهده شـده می‌باشند.

شـاخص RMSE میـانگین اختلافـات موجـود بـین داده‌هـای شـبیه‌سـازی شـده بـا مقـادیر مشاهده شـده را بـا واحـدی یکسـان اندازه‌گیری می‌کند؛ در حالی که شاخص nRMSE با حـذف واحـدها امکان مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل برای متغیرهای دارای واحدهای متفاوت را فراهم می‌سازد. مقادیر شاخص nRMSE در بازه‌های ۱۰-۰، ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی وضعیت ایده‌آل (عـالی)، مناسب (خوب) و متوسط مـدل در پـیش‌بینـی و بیشـتر از ۳۰ درصـد بیانگر عدم کارا بودن مدل می‌باشد.

1- Normalized root mean square error

ضریب باقیمانده (CRM) (رابطه ۵):

$$CRM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} Pi}{\sum_{i=1}^{n} Oi} \qquad (۵)$$

که در آن، Pi و Oi به‌ترتیب داده شبیه‌سازی شده و داده مشاهده شده می‌باشند.

مقادیر منفی آماره‌ی CRM نشان‌دهنده‌ی تمایل مدل (در حالت کلی) برای بیش‌برآورد[1] و مقادیر مثبت آن حاکی از تمایل مدل برای کم‌برآورد[2] در مقایسه با مقادیر مشاهده شده می‌باشد (Moriasi *et al*., 2007).

شاخص توافق ویلموت (d-index) (رابطه ۶)

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Pi-Oi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|\acute{P}\iota|-|\acute{O}\iota|)^2} \qquad (۶)$$

$$|\acute{P}\iota| = |Pi - \bar{O}|$$

$$|\acute{O}\iota| = |Oi - \bar{O}|$$

که در آن، Pi، Oi و $\bar{O}$ به‌ترتیب داده شبیه‌سازی شده، داده مشاهده شده و میانگین داده‌های مشاهده شده می‌باشند.

مقدار شاخص توافق ویلموت بین ۱-۰ متغیر است که میزان انطباق میان داده‌های مشاهده شده و مقادیر شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. نزدیک بودن مقدار این شاخص به ۱ بیانگر نزدیکی مقادیر شبیه‌سازی شده به مقادیر واقعی و در حقیقت کارکرد بهتر مدل است.

ضریب تبیین[3] (R^2) (رابطه ۷):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(pi-\bar{O})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2} \qquad (۷)$$

از ضریب تبیین می‌توان به‌عنوان بخشی از واریانس (پراکندگی) موجود در میان داده‌های مشاهده شده که قابل تعمیم به واریانس موجود در میان داده‌های شبیه‌سازی شده می‌باشند یاد کرد که با استفاده از رگرسیون توصیف و محاسبه می‌گردد (این شاخص نسبت پراکندگی بین داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهده شده را نشان می‌دهد) (Mendenhall *et al*., 1996). در صورت وجود تطابق کامل رگرسیونی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، مقدار آماره‌ی R^2 برابر با ۱ بوده و با کاهش مقدار این شاخص، درصد کمتری از تغییرات داده‌ها توسط خط رگرسیونی توجیه می‌شود. در صورت عدم وجود هیچ‌گونه رابطه‌ی رگرسیونی، R^2=۰ خواهد بود.

مقایسات میانگین‌ها بر مبنای آزمون دانکن (۵٪) با استفاده از نرم‌افزار SAS و رسم شکل‌ها در نرم‌افزار اکسل انجام شد.

نتایج و بحث

فنولوژی

به‌طور کلی نکته‌ی بسیار مهم و قابل‌توجه در رابطه پیش‌بینی فنولوژی گیاه (تاریخ گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک) توسط مدل، عدم حساسیت مدل APSIM در پیش‌بینی فنولوژی گیاه نسبت به مقادیر مختلف کود نیتروژن بود (جدول ۵). در واقع تغییر در مقدار کود نیتروژن، تغییری در تاریخ پیش‌بینی شده برای گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک گیاه توسط مدل ایجاد نکرد و خروجی مدل برای هر کدام از هیبریدها تحت تمامی تیمارهای کودی (۰، ۹۲ و ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار) در رابطه با صفات مذکور در هر سال از آزمایش عدد یکسانی بود (به‌ترتیب ۶۶ و ۶۴ روز پس از کاشت در سال ۱۳۹۴؛ مقادیر متناظر در رابطه با تاریخ رسیدگی فیزیولوژیک گیاه برابر با ۱۲۳ و ۱۲۱ روز پس از کاشت در سال ۱۳۹۴ بود)، در حالی که آزمایش مزرعه‌ای حاکی از تاثیر قابل‌توجه تنش نیتروژن بر وقوع تاخیر در مراحل فنولوژیک گیاه به‌ویژه زمان گلدهی بود (جدول ۵). از این‌رو یکی از یافته‌های مهم تحقیق حاضر، شناسایی عدم حساسیت مدل APSIM نسبت به مقادیر مختلف نیتروژن در پیش‌بینی فنولوژی گیاه بود که بدون تردید نیاز مدل نسبت به اصلاح و تقویت آن در این بخش را آشکار می‌سازد. با این وجود، مدل توانست فنولوژی هر دو هیبرید مورد بررسی را با دقت بالایی (به‌ویژه تاریخ رسیدگی فیزیولوژیک) در مجموع مقادیر کودی (۰، ۹۲ و ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار) شبیه‌سازی نماید. به طور متوسط مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) در پیش‌بینی تاریخ گلدهی هیبریدها کمتر از ۱۰٪ و برای تاریخ رسیدگی فیزیولوژیک کمتر از ۵٪ بود (جدول ۵ و ۶). اختلاف نسبی موجود بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در رابطه با فنولوژی گیاه ناشی از کم‌برآورد جزئی مدل به‌ویژه در مرحله‌ی اعتبارسنجی (۱۳۹۴) بود. مقادیر ضریب باقی‌مانده برای تاریخ گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک به‌طور متوسط برای هر دو هیبرید برابر با ۰/۱۷۵ و ۰/۰۶ بود (جدول ۵ و ۶). مقدار شاخص توافق ویلموت (d) برای شبیه‌سازی فنولوژی طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به طور میانگین حدود ۰/۴ بود که حاکی از وجود انطباق متوسط میان داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده در رابطه با تاریخ‌های گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک گیاه بود (جدول ۵ و ۶).

آرکانتولیس و همکاران (Archontoulis *et al*., 2003) از مدل APSIM-Maize برای شبیه‌سازی تاثیر مقادیر مختلف نیتروژن بر فنولوژی چهار هیبرید ذرت در غرب ایالات متحده استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل توانایی مناسبی در شبیه‌سازی فنولوژی گیاه در مقادیر مختلف نیتروژن در رابطه با اکثر هیبریدها به میزان کمتر از دو روز اختلاف بود (nRMSE=۱/۵۲ روز). مطالعه دیگری (Seyoum *et al*., 2018) در آفریقا در ارزیابی مدل APSIM-Maize در چهار منطقه اتیوپی نشان داد که مدل توانایی مناسبی در شبیه‌سازی روز تا گلدهی و رسیدگی (nRMSE=۴٪) دارد.

1- Overestimate
2- Underestimate
3- Coefficient of determination

جدول ۵- مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل APSIM برای تاریخ گلدهی هیبریدهای ذرت (سینگل‌کراس ۷۰۴ و ماکسیما) تحت تاثیر مقادیر مختلف نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳٦۸ کیلوگرم در هکتار) طی مرحله اعتبارسنجی (۱۳۹٤) مدل APSIM

Table 5- Observed and simulated values and evaluation parameters of APSIM model for flowering date of maize hybrids (KSC 704 and Maxima) under different amounts of nitrogen (0, 92 and 368 kg ha^{-1}) during evaluation (1394) stage of APSIM model

هیبرید (Hybrid)	اعتبارسنجی (۱۳۹٤) Evaluation (2015)				اعتبارسنجی (۱۳۹٤) Evaluation (2015)	
	D-index (-)	CRM (-)	nRMSE (%)		شبیه‌سازی‌شده Simulated	مشاهده‌شده Observed
سینگل‌کراس ۷۰۴ (KSC 704)	0.33	0.185	11.17	N0 kg ha^{-1}	66	87
				N92 kg ha^{-1}	66	80
				N368 kg ha^{-1}	66	76
ماکسیما (Maxima)	0.34	0.165	9.95	N0 kg ha^{-1}	64	82
				N92 kg ha^{-1}	64	74
				N368 kg ha^{-1}	64	74

nRMSE: جذر میانگین مربعات خطای نرمال، CRM: ضریب باقی‌مانده، D-index: شاخص توافق ویلموت

nRMSE: Normalized root mean square error, CRM: Residual coefficient, D-index: Wilmot agreement index

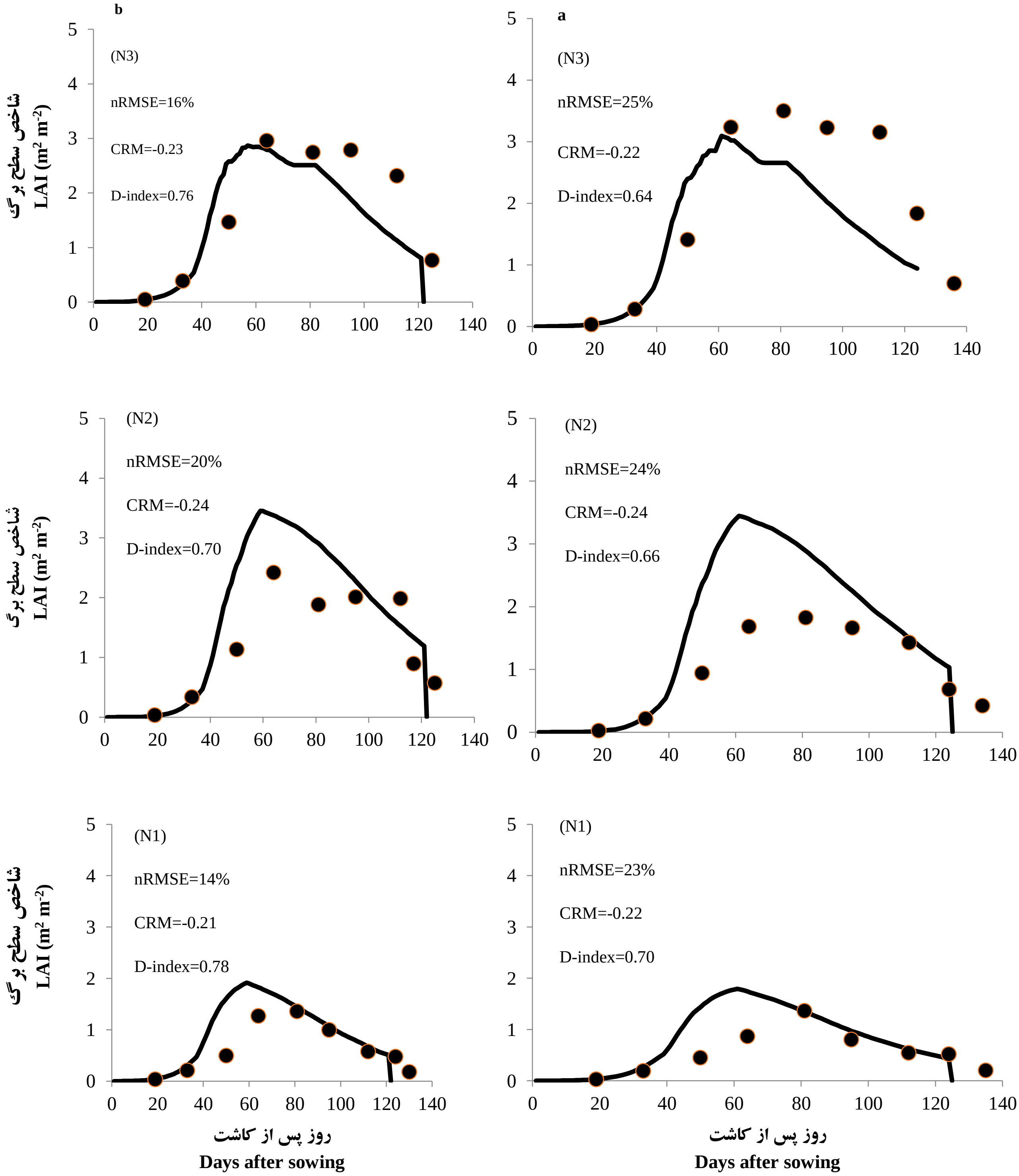
جدول ٦- مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل APSIM برای رسیدگی فیزیولوژیک هیبریدهای ذرت (سینگل‌کراس ۷۰٤ و ماکسیما) تحت تاثیر مقادیر مختلف نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳٦۸ کیلوگرم در هکتار) طی مرحله اعتبارسنجی (۱۳۹٤) مدل APSIM

Table 6- Observed and simulated values and evaluation parameters of APSIM model for physiological maturity of maize hybrids (KSC 704 and Maxima) under different amounts of nitrogen (0, 92 and 368 kg ha^{-1}) during evaluation (1394) stage of APSIM model

هیبرید (Hybrid)	اعتبارسنجی (۱۳۹٤) Evaluation(2015)				اعتبارسنجی (۱۳۹٤) Evaluation (2015)	
	D-index (-)	CRM (-)	nRMSE (%)		شبیه‌سازی شده (Simulated)	مشاهده شده (Observed)
سینگل‌کراس ۷۰۴ (KSC 704)	0.09	0.08	5.14	N0 kg ha^{-1}	123	135
				N92 kg ha^{-1}	123	134
				N368 kg ha^{-1}	123	136
ماکسیما (Maxima)	0.4	0.04	2.79	N0 kg ha^{-1}	121	130
				N92 kg ha^{-1}	121	125
				N368 kg ha^{-1}	121	125

nRMSE: جذر میانگین مربعات خطای نرمال، CRM: ضریب باقی‌مانده، D-index: شاخص توافق ویلموت

nRMSE: normalized root mean square error, CRM: residual coefficient, D-index: Wilmot agreement index



شکل ۱- ارزیابی شاخص سطح برگ مشاهده شده (نقطه) و شبیه‌سازی شده (خط) در هیبرید سینگل‌کراس ٧٠٤ (a) و ماکسیما (b) تحت تاثیر مقادیر مختلف نیتروژن (N1، N2 و N3 به‌ترتیب ۰، ۹۲ و ۳٦۸ کیلوگرم در هکتار) با استفاده از مدل APSIM در سال ۱۳۹٤

Figure 1- Evaluation of observed LAI (point) and simulated (line) of KSC 704 hybrid under different amounts of nitrogen (N1, N2 and N3 0, 92 and 368 kg ha^{-1}, respectively) using APSIM model in 2015

جدول ۷- پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل APSIM در پیش‌بینی شاخص سطح برگ بیشینه هیبریدهای ذرت (سینگل‌کراس ۷۰٤ و ماکسیما) تحت تاثیر مقادیر مختلف نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳٦۸ کیلوگرم در هکتار) در سال ۱۳۹٤

Table 7- Performance evaluation parameters of APSIM model in simulating maximum LAI of maize hybrids (KSC 704 and Maxima) under the different amounts of nitrogen (0, 92 and 368 kg ha^{-1}) during 2015

هیبرید (Hybrid)	اعتبارسنجی (۱۳۹٤)(2015) Evaluation		
	D-index (-)	CRM (-)	nRMSE (%)
سینگل‌کراس ۷۰۴(KSC 704)	0.66	-0.24	25.87
ماکسیما (Maxima)	0.73	-0.22	17.5

nRMSE: جذر میانگین مربعات خطای نرمال، CRM: ضریب باقی‌مانده، D-index: شاخص توافق ویلموت

nRMSE: normalized root mean square error, CRM: residual coefficient, D-index: Wilmot agreement index

شاخص سطح برگ (LAI)

شبیه‌سازی روند تغییرات شاخص سطح برگ در طول فصل رشد برای دو هیبرید سینگل‌کراس ۷۰۴ و ماکسیما نسبتا خوب نبود (شکل ۱). پیش‌بینی شاخص سطح برگ در طول فصل رشد گیاه توسط مدل در سال دوم آزمایش (اعتبارسنجی) ضعیف بود (شکل ۱). در مجموع، اختلاف چندانی بین مقادیر مخلف نیتروژن در رابطه با دقت مدل در شبیه‌سازی تغییرات شاخص سطح برگ در طول فصل رشد دو هیبرید مورد بررسی مشاهده نشد.

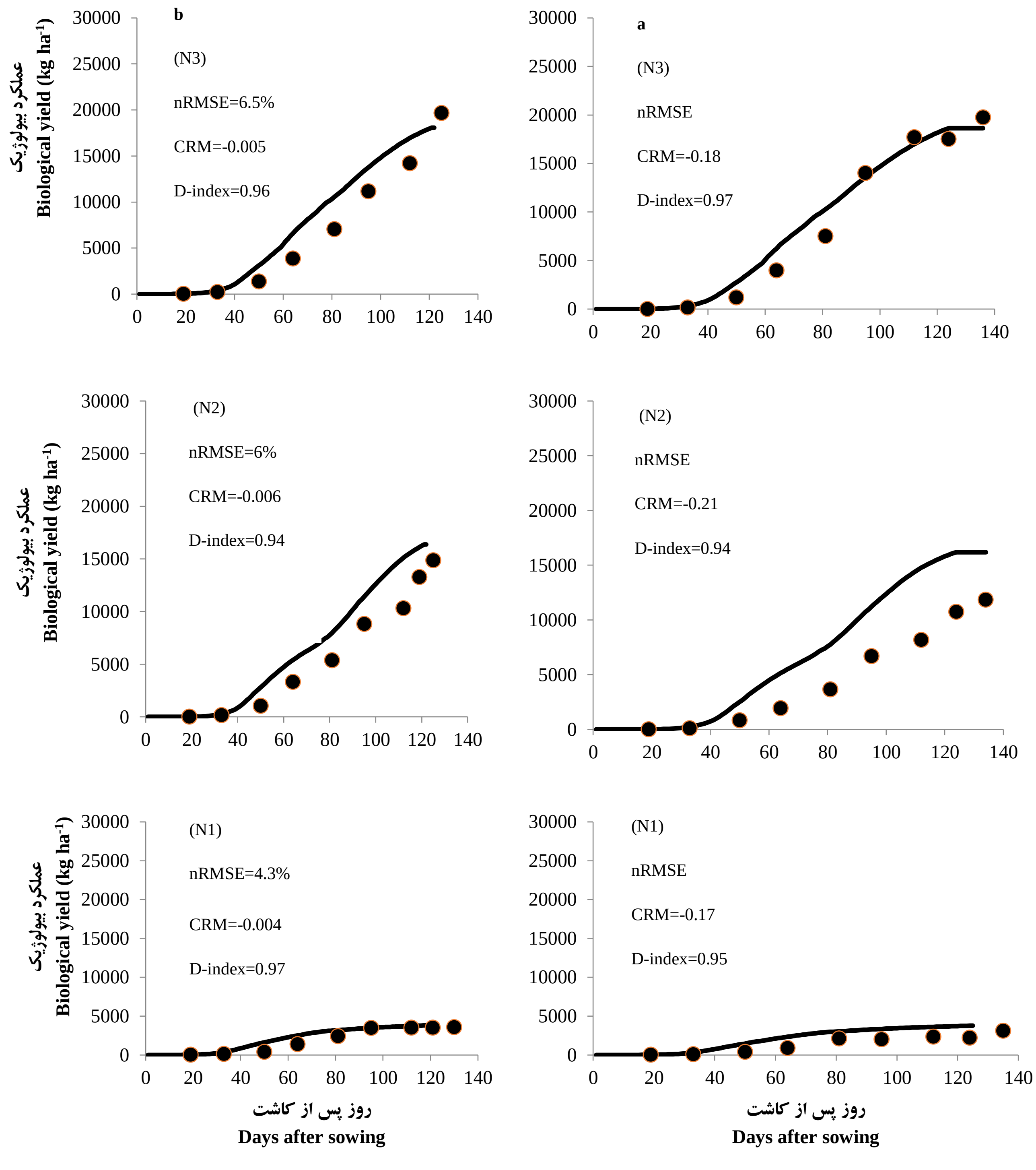
آرکانتولیس و همکاران (Archontoulis *et al.*, 2003) در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ چهار رقم ذرت در مناطق شرقی آمریکا با استفاده از مدل APSIM-Maize نشان دادند که مدل توانایی مناسبی در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ (۰/۶۰m^2 m^{-2} =nRMSE) دارد. در مرحله‌ی اعتبارسنجی، دقت مدل در شبیه‌سازی مقدار شاخص سطح برگ بیشینه‌ی تمامی هیبریدها به شدت کاهش یافت (مقادیر ۲۵/۸ و ۱۷/۵ درصد nRMSE به‌ترتیب برای هیبریدهای سینگل‌کراس ۷۰۴ و ماکسیما) که ناشی از بیش‌برآورد بالای مدل در این باره بود (جدول ۷). علت این امر می‌تواند عدم دقت در اندازه‌گیری سطح برگ توسط محقق در آزمایشگاه باشد، زیرا ممکن است برگ‌ها زرد و یا تا خورده باشد که این باعث عبور نور از حاشیه برگ‌ها می‌شود. قابلیت پیش‌بینی تغییرات سطح برگ نیز در مدل‌های زراعی دارای اهمیت است که این نتایج با آزمایش Paknejad *et al.*, (2017) همسو است.

عملکرد بیولوژیک

روند تجمع مجموع ماده خشک گیاهی در طول فصل رشد در رابطه با دو هیبرید با دقت بالایی توسط مدل پیش‌بینی شد و فقط در چند تیمار بیش‌برآورد جزئی در طول فصل رشد توسط مدل مشاهده شد (شکل ۲). شبیه‌سازی مقدار بیوماس نهایی برای دو هیبرید سینگل‌کراس ۷۰۴ و ماکسیما با دقت بالایی توسط مدل انجام شد. مقدار آماره‌ی nRMSE برای شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیک هیبریدهای سینگل‌کراس ۷۰۴ و ماکسیما در مرحله‌ی اعتبارسنجی برابر با ۱۳/۹ و ۵/۷ درصد بود (جدول ۸). مقادیر جزئی بیش‌برآورد (CRM=-۰/۱۸ و CRM=-۰/۰۰۵) در مرحله‌ی اعتبارسنجی توسط مدل مشاهده شد. همچنین مقادیر بالای شاخص توافق ویلموت (d) برای این دو هیبرید (۰/۹۵ و ۰/۹۹)، حاکی از عملکرد بهتر مدل در شبیه‌سازی میزان عملکرد بیولوژیک بود (جدول ۸).

نمودار یک به یک مربوط به مقایسه‌ی بیوماس نهایی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده با یکدیگر برای هیبریدهای مورد بررسی تحت تاثیر مجموع تیمارهای نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار) نشان داد که عملکرد کلی مدل در مجموع تیمارها برای تمامی مقادیر نیتروژن رضایت‌بخش بود و کمترین اختلاف میان داده‌های مشاهده شده با نتایج حاصل از مدل به‌ترتیب مربوط به هیبریدهای ماکسیما (R^2=۰/۸۵) و سینگل‌کراس ۷۰۴ (R^2=۰/۷۲) بود (شکل ۳ الف و ب).

کپونگور (Kpongor, 2007) ضمن استفاده از مدل APSIM (version, 4) برای پیش‌بینی پاسخ عملکرد بیولوژیک سورگوم نسبت به کود نیتروژن و فسفر تحت دو سیستم متفاوت مدیریتی در غنا، قدرت پیش‌بینی عملکرد بیولوژیک (R^2=۰/۸۶) توسط مدل را خوب ارزیابی کردند. به‌طور مشابهی دلوه و همکاران (Delve *et al.*, 2009) بیان داشتند که مدل APSIM در پیش‌بینی رشد و عملکرد گیاهان ذرت و لوبیا تحت تاثیر منابع مختلف تامین فسفر (کود شیمیایی و کود مرغی) و مقادیر مختلف آن از اعتبار کافی برخوردار است. سولر و همکاران (Soler *et al.*, 2007) نتیجه‌ی مشابهی در رابطه با کارکرد مدل CERES-Maize در زمینه‌ی شبیه‌سازی مجموع بیوماس تولیدی توسط چهار هیبرید ذرت دانه‌ای با گروه‌های رسیدگی متفاوت گزارش کردند.



شکل ۲- مقایسه وزن خشک مجموع بیوماس گیاهی مشاهده شده (نقطه) و شبیه‌سازی شده (خط) در هیبرید سینگل‌کراس ۷۰٤ (a) و ماکسیما (b) تحت تاثیر مقادیر مختلف نیتروژن (N1، N2 و N3 به‌ترتیب ۰، ۹۲ و ۳٦۸ کیلوگرم در هکتار) با استفاده از مدل APSIM در سال ۱۳۹٤

Figure 2- Evaluation of observed biological yield (point) and simulated (line) of KSC 704 hybrid under different amounts of nitrogen (N1, N2 and N3 0, 92 and 368 kg ha^{-1}, respectively) using APSIM model in 2015

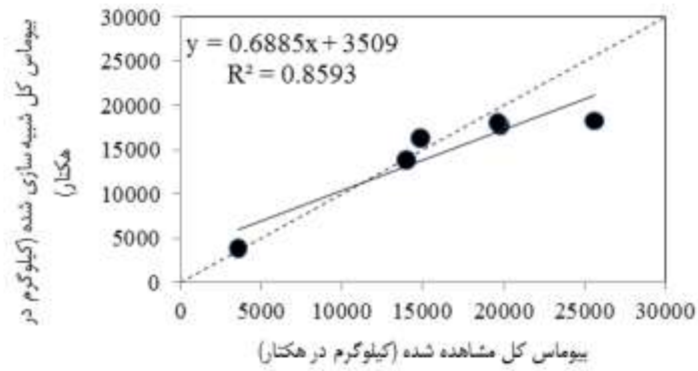
جدول ۸- پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل APSIM در پیش‌بینی عملکرد بیولوژیک هیبریدهای ذرت (سینگل‌کراس ٧٠٤ و ماکسیما) تحت تاثیر مقادیر مختلف نیتروژن (۰، ۹۲ و ٣٦٨ کیلوگرم در هکتار) طی مراحله اعتبارسنجی (١٣٩٤)

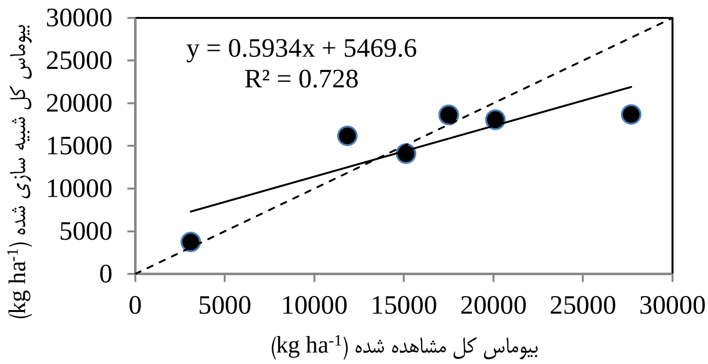
Table 8- Performance evaluation parameters of APSIM model in simulating biological yield of maize hybrids (KSC 704 and Maxima) under the different amounts of nitrogen (0, 92 and 368 kg ha^{-1}) during evaluation (2015) stages.

هیبرید (Hybrid)	اعتبارسنجی (١٣٩٤)(Evaluation (2015)		
	D-index (-)	CRM (-)	nRMSE (%)
سینگل‌کراس ۷۰۴ (KSC 704)	0.95	-0.18	13.95
ماکسیما (Maxima)	0.99	-0.005	5.78

nRMSE: جذر میانگین مربعات خطای نرمال، CRM: ضریب باقی‌مانده، D-index: شاخص توافق ویلموت

nRMSE: normalized root mean square error, CRM: residual coefficient, D-index: Wilmot agreement index





شکل ۳- مقایسه مجموع بیوماس مشاهده شده و شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل APSIM برای هیبریدهای سینگل‌کراس ٧٠٤ (الف) و ماکسیما (ب) تحت مقادیر مختلف نیتروژن (۰، ۹۲ و ٣٦٨ کیلوگرم در هکتار) طی سال ١٣٩٤ (اعتبارسنجی). خط تو پر، خط ١:١ و نقطه‌چین خط رگرسیون است.

Figure 3- Comparison of observed and simulated total biomass using APSIM model for KSC 704 (a) and Maxima (b) hybrids under different amounts of nitrogen (0, 92 and 368 kg ha^{-1}) during 2015 (Evaluation) year. Continuous line: 1 to1 line; dashed line: regression line.

عملکرد دانه

مدل APSIM توانست عملکرد دانه‌ی دو هیبرید سینگل‌کراس ۷۰۴ و ماکسیما را تحت تاثیر مجموع تیمارهای نیتروژن در مرحله اعتبارسنجی با دقت بالایی پیش‌بینی کند. مقادیر nRMSE برای پیش‌بینی عملکرد دانه هیبریدهای سینگل‌کراس ۷۰۴ و ماکسیما در مرحله‌ی اعتبارسنجی برابر با ۱۳/۲۱ و ۱۱/۸۷ درصد بود (جدول ۹).

شاخص توافق ویلموت بیانگر وجود اختلاف کمتر میان داده‌های مشاهده شده با داده‌های شبیه‌سازی شده در مجموع تیمارهای نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار) در مرحله‌ی اعتبارسنجی (d=۰/۹۷) مدل بود (جدول ۹). همچنین برای ارزیابی مدل از دو آزمایش دیگر علاوه بر آزمایش سال ۱۳۹۴ نیز استفاده شد؛ که مقادیر nRMSE، CRM و شاخص ویلموتس به‌ترتیب ۹ درصد،

-۰/۱۱ و ۰/۹۲ بود (شکل ۴). مقدار متوسط ضریب تبیین (R^2)، nRMSE و شاخص ویلموتس برای عملکرد دانه ذرت در آزمایش رحیمی مقدم و همکاران (Rahimi-Moghaddam *et al*., 2018) به‌ترتیب برابر با ۰/۷۷، ۹/۸ درصد و ۰/۸۴ بود و آن‌ها بیان داشتند که مدل APSIM در پیش‌بینی رشد و عملکرد ذرت تحت تیمارهای مختلف نیتروژن، رقم و آبیاری از اعتبار کافی برخوردار است. کپونگور (Kpongor, 2007) قدرت مدل (version, 4) APSIM در پیش‌بینی عملکرد دانه سورگوم نسبت به کود نیتروژن و فسفر تحت دو سیستم متفاوت مدیریتی در غنا را خوب (R^2=۰/۸۱) ارزیابی کردند.

میائو و همکاران (Miao *et al*., 2006) ضمن ارزیابی توانایی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی عملکرد دانه برای دو هیبرید ذرت (33G26 و 33J24) تحت پنج مقدار نیتروژن (۰، ۱۱۲، ۱۶۸، ۲۲۴ و ۳۳۶ کیلوگرم در هکتار) دریافتند که به استثنای تیمار بدون کود، در سایر تیمارها مدل از قدرت پیش‌بینی بالایی برخوردار بوده؛ به گونه‌ای که توانست ۹۳ درصد از تغییرات موجود در داده‌های مربوط به عملکرد هیبریدها را توجیه نماید (Error<10%). سولر و همکاران (Soler *et al*., 2007) نتایج مشابهی گزارش کردند.

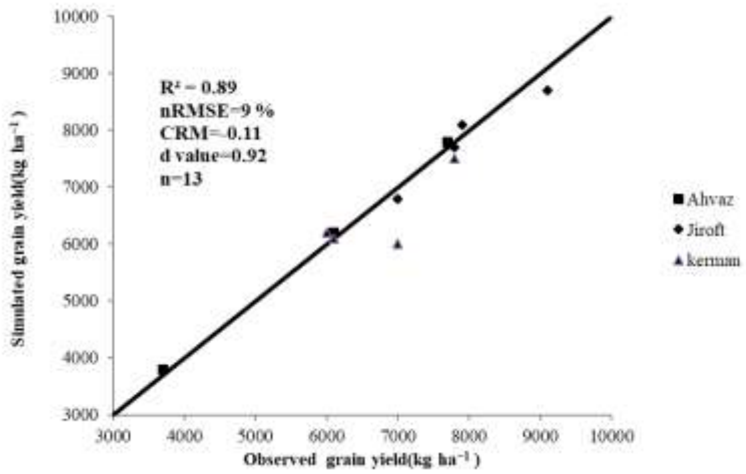
جدول ۹- پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل APSIM در پیش‌بینی عملکرد دانه هیبریدهای ذرت (سینگل‌کراس ۷۰٤ و ماکسیما) تحت تاثیر مقادیر مختلف نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳٦۸ کیلوگرم در هکتار) طی مرحله اعتبارسنجی (۱۳۹٤)

Table 9- Performance evaluation parameters of APSIM model in simulating grain yield of maize hybrids (KSC 704 and Maxima) under the different amounts of nitrogen (0, 92 and 368 kg ha^{-1}) during evaluation (2015) stage.

هیبرید (Hybrid)	Evaluation (2015)(۱۳۹٤) اعتبارسنجی		
	D-index (-)	CRM (-)	nRMSE (%)
سینگل‌کراس ۷۰۴ (KSC 704)	0.97	-0.15	13.21
ماکسیما (Maxima)	0.97	0.14	11.87

nRMSE: جذر میانگین مربعات خطای نرمال، CRM: ضریب باقی‌مانده، D-index: شاخص توافق ویلموت

nRMSE: normalized root mean square error, CRM: residual coefficient, D-index: Wilmot agreement index



شکل ٤- مقایسه عملکرد دانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل APSIM بر اساس داده‌های حاصل از دو آزمایش مستقل (Choukan, 2013; Rafiee Manesh *et al*., 2010) برای هیبرید سینگل‌کراس ۷۰٤ و ماکسیما و همچنین آزمایش سال ۱۳۹٤ (اعتبارسنجی) در کرمان

Figure 4- Comparison of observed and simulated grain yield of KSC 704 and Maxima hybrid using independent two set data (Choukan, 2013; Rafiee Manesh *et al*., 2010) and under different amounts of nitrogen (0, 92 and 368 kg ha^{-1}) during 2015

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط مدل APSIM حاکی از شبیه‌سازی رشد و عملکرد دو هیبرید سینگل‌کراس ۷۰۴ و ماکسیما با دقت بالا بود. قدرت مدل در شبیه‌سازی فنولوژی هر دو هیبرید ذرت بسیار بالا بود اما ضعف اصلی مدل در این قسمت، عدم حساسیت آن نسبت به تاثیر تنش نیتروژن بر فنولوژی گیاه بود. کارکرد کلی مدل در رابطه با پیش‌بینی فنولوژی، عملکرد بیوماس و عملکرد دانه نهایی هیبریدها تحت تاثیر مقادیر مختلف نیتروژن رضایت‌بخش بود. از میان پارامترهای گیاهی، شبیه‌سازی شاخص سطح برگ با دقت کمتری در مقایسه با سایر پارامترها توسط مدل صورت گرفت. مقادیر میانگین

nRMSE طی اعتبارسنجی مدل برای عملکرد دانه هیبریدهای سینگل‌کراس و ماکسیما ۱۱/۷ درصد بود. نتایج حاصل، نشان‌دهنده‌ی توانمدی و کارآمدی بالای مدل APSIM در زمینه‌ی شبیه‌سازی رشد و عملکرد هیبریدهای سینگل‌کراس ۷۰۴ و ماکسیما در مناطق نیمه‌خشک از جمله کشور ایران می‌باشد. از این رو این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری قابل اعتماد برای پیش‌بینی صفات و پارامترهای مهم گیاهی مانند عملکرد محصول قبل از انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای، کاهش هزینه‌های تحقیقاتی و تخمین صحیح میزان سازگاری هیبریدهای رایج و جدید ذرت نسبت به مناطق مختلف و در عین حال شرایط مختلف تغذیه‌ای خاک به‌کار گرفته شده و همچنین نقش بسیار مهمی در اتخاذ تصمیمات خرد و کلان مدیریتی در راستای مدیریت پایدار مزارع ذرت در کشور ایفا نماید.

References

1. Abera, K. (2013). Growth, productivity and nitrogen use efficiency of maize (*Zea mays* L.) as influenced by rate and time of nitrogen fertilizer application in Haramaya District. Eastern Ethiopia. Haramaya University. MSc Thesis.
2. Afzali, M., Taei Semiromi, J., & Amirinezhad, M. (2018). Evaluation of WOFOST model for growth and development simulation of maize under summer cropping system conditions in sub-tropical region of Southern Kerman. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *49*, 57-64. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/ijfcs.2017.205678.654112
3. Ahmed, M., & Hassan, F. (2011). *APSIM and DSSAT models as decision support tools*. 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia.
4. Alley, M., Martz Jr, M. E., Davis, P., & Hammons, J. (2009). *Nitrogen and Phosphorous Fertilization of Corn*. Virginia Cooperative Extension. Virginia Tech, and Virginia State University. Publ. 424-027.
5. Amjed, A., Sanjani, S., Hoogenboom, G., Ahmad, A., Khaliq, T., Wajid, S., Noorka, I., & Ahmad, S. (2012). Application of crop growth models in agriculture of developing countries: a review. *New Horizons Science Technology*, *1*, 95-99.
6. Anonymous. (2020). Agricultural Statistics. Iranian Ministry of Agricultural Jihad. Department of Planning and Economic Affairs. Center of Statistics and Information Technology. Iran. p. 158. (in Persian)
7. Antonietta, M., Acciaresi, H., & Guiamet, J. (2015). Responses to N deficiency in stay green and non-stay green argentinean hybrids of maize. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *202*(3), 231-242. https://doi.org/10.1111/jac.12136
8. Archontoulis, S. V., Miguez, F. E., & Moore, K. J. (2014). Evaluating APSIM maize, soil water, soil nitrogen, manure, and soil temperature modules in the Midwestern United States. *Agronomy Journal*, *106*, 1025-1040. doi:10.2134/agronj2013.0421
9. Choukan, R. (2013). Final Report of Yield Trial and Adaptability of Late and Medium Maturing promising Hybrids of Maize (Final Stage). In: Seed and Plant Improvement Institute (Ed.), Agricultural Research, Education and Extension Organization, Iran, pp. 50 (in Persian with English abstract).
10. Delve, R. J., Probert, M. E., Cobo, J., Ricaurte, J., Rivera, M., Barrios, E., & Rao, I. M. (2009). Simulating phosphorus responses in annual crops using APSIM: model evaluation on contrasting soil types. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *84*, 293-306. https://doi.org/10.1007/s10705-008-9243-6
11. Ebrahimi, M., Rezaverdinejad, V., & Majnoni Haris, A. (2015). Simulation of corn growth under different water and nitrogen management with AquaCrop model. *Iranian Soil and Water Research*, *46*, 207-220. (in Persian with English abstract).
12. FAO Statistical Database. Agriculture statistics. 2008. Retrived on 27 March 2008 from: http://URL: faostat,fao.org/faostat.
13. FAO Statistical Database. Agriculture statistics. 2015. Retrived on 13 May 2015 from: http://URL: faostat,fao.org/faostat.
14. Gungula, D., Kling, J., & Togun, A. (2003). CERES-Maize predictions of maize phenology under nitrogen-stressed conditions in Nigeria. *Agronomy Journal*, *95*, 892-899.
15. Heng, L., Asseng, S., Mejahed, K., & Rusan, M. (2007). Optimizing wheat productivity in two rain-fed environments of the West Asia–North Africa region using a simulation model. *European Journal of Agronomy*, *26*, 121-129. https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.09.001
16. Hoogenboom, G., Jones, J. W., Porter, C. H., Wilkens, P. W., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., & Tsuji G. Y. (2021). Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version, 10(6), 117-124.
17. Hopkins, B., Rosen, C., Shiffler, A., & Taysom, T. (2008). Enhanced efficiency fertilizers for improved nutrient management: potato (Solanum tuberosum). *Crop Management*, *7*(1), 1-16.
18. Kaur, H., Jalota, S., Kanwar, R., & Bhushan, B. (2012). Climate change impacts on yield, evapotranspiration and nitrogen uptake in irrigated maize (*Zea mays*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping system: A simulation analysis. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, *82*, 213.

19. Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., Huth, N. I., Hargreaves, J. N., Meinke, H., & Hochman, Z. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, *18*, 267-288.
20. Kpongor, D. S. (2007). *Spatially explicit modeling of sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench) production on complex terrain of a semi-arid region in Ghana using APSIM*. Universitäts-und Landesbibliothek Bonn. PhD Thesis.
21. Liu, H.,Yang, J., Drury, C. A., Reynolds, W., Tan, C., Bai, Y., He, P., Jin, J., & Hoogenboom, G. (2011). Using the DSSAT-CERES-Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize production. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *89*, 313-328. https://doi.org/10.1007/s10705-010-9396-y.
22. McCown, R., Hammer, G., Hargreaves, J., Holzworth, D., & Freebairn, D. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, *50*, 255-271. https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00055-V
23. Mendenhall, W., Sincich, T., & Boudreau, N. S. (1996). *A second course in statistics: regression analysis*. Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey.
24. Miao, Y., Mulla, D. J., Batchelor, W. D., Paz, J. O., Robert, P. C., & Wiebers, M. (2006). Evaluating management zone optimal nitrogen rates with a crop growth model. *Agronomy Journal*, *98*, 545-553.
25. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M.W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, *50*, 885-900.
26. Paknejad, F., Moayeri por, S., Aghayari, F., & Nabi Ilkaei, M. (2017). Simulation of maize yield with different levels of nitrogen by using DSSAT model. *Journal of Crop Ecophysiology*, *43*, 503-518. (in Persian with English abstract).
27. Prescott, J. A. (1940). Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, *64*, 114-118.
28. Rafiee Manesh, S., Aynehband, A., & Nabati Ahmadi, D. (2010). Investigating the effect of irrigation water amount and irrigation depletion time in different stages of growth on yield and yield components of the SC704 maize hybrid under Ahwaz climatic conditions. *Crop Physiology Journal*, *7*, 93-105. (in Persian).
29. Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J., & Deihimfard, R. (2019). Optimal genotype× environment× management as a strategy to increase grain maize productivity and water use efficiency in water-limited environments and rising temperature. *Ecological Indicator*, *107*, 1-17.
30. Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J., & Deihimfard, R. (2018). Adaptation strategies to lessen negative impact of climate change on grain maize under hot climatic conditions: a model-based assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, *253*, 1-14.
31. Seyoum, S., Rachaputi, R., Chauhan, Y., Prassana, B., & Fekybelu, S. (2017). Application of the APSIM model to exploit G×E×M interactions for maize improvement in Ethiopia. *Field Crops Research*, *217*, 113-124.
32. Shamudzarira, Z., & Robertson, M. (2002). Simulating response of maize to nitrogen fertilizer in semi-arid Zimbabwe. *Experimental Agriculture*, *38*, 79-96.
33. Soler, C. M. T., Sentelhas, P. C., & Hoogenboom, G. (2007). Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. European *Journal of Agronomy*, *27*, 165-177.
34. Soltani, A. (2012). Modeling physiology of crop development, growth and yield. CABI. Wallingford.
35. Tscharntke, T., Clough, Y., Wanger, T. C., Jackson, L., Motzke, I., Perfecto, I., Vandermeer, J., & Whitbread, A. (2012). Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation*, *151*, 53-59.
36. Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Elsevier. Amsterdam.
37. Willmott, C., Robesonb, S., & Matsuuraa, K. (2012). Short Communication: A Refined Index of Model Performance. *International Journal of Climatology*, *32*, 2088-2094.
38. Wu, Y., Liu, W., Li, X., Li, M., Zhang, D., Hao, Z., Weng, J., Xu, Y., Bai, L., & Zhang, S. (2011). Low-nitrogen stress tolerance and nitrogen agronomic efficiency among maize inbreds: comparison of multiple indices and evaluation of genetic variation. *Euphytica*, *180*, 281-290.
39. Zsubori, Z. T., Pinter, J., Spitko, T., Hegyi, Z., & Marton, C. L. (2013). Yield and chemical composition of plant parts of silage maize (*Zea mays* L.) hybrids and their interest for biogas production. *Maydica*, *58*, 34-41.